

# Anwendung von Mustererkennungsverfahren zur Schadensanalyse in faserverstärkten Kunststoffen

Markus G.R. SAUSE, Siegfried HORN, Universität Augsburg, Augsburg  
Markus KLUG, Jochen SCHOLLER, Premium Aerotec, Augsburg

**Kurzfassung.** Das veränderte Werkstoffverhalten als Funktion der Herstellungsparameter von kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffen wurde mittels Schallemission untersucht. Dabei sollte das Potential von Mustererkennungsverfahren angewendet auf die gemessenen Schallemissionssignale an Proben im Labormaßstab getestet werden. Dazu wurden kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe mit variierendem Matrixhärtegrad unter Belastung in Vier-Punkt-Biegung untersucht.

Die aufgezeichneten Schallemissionssignale wurden mittels Mustererkennungsverfahren analysiert und die resultierenden Signalklassen anhand ihrer Frequenzzusammensetzung, Lokalisierung und der Häufigkeit ihres Auftretens charakterisiert. Zur Identifikation und Interpretation der Signalklassen wurden jeweils die mittleren Frequenzspektren und mittleren Wavelet-Koeffizienten mit einer speziell entwickelten Software (AWARE++) errechnet.

Es konnten typische Signalklassen für Matrixrisse, Faserrisse und eine Signalklasse für Schadensmechanismen mit Faser-Matrix Versagen identifiziert werden, die konsistent sind mit experimentellen Ergebnissen von [1] und grundsätzlichen Überlegungen zur Ausbreitung von Plattenwellen nach [2]. Die Häufigkeit des Auftretens der jeweiligen Klasse korreliert mit mikroskopischen Beobachtungen des jeweiligen Schädigungstyps. Änderungen der Faser-Matrix Wechselwirkung zeigen sich anhand von Veränderung der Zusammensetzung der entstehenden Wellenmoden. Damit eröffnet die Schallemissionsanalyse die Möglichkeit eines qualitativen Vergleichs der zu erwartenden Schädigungen bei Veränderung fundamentaler Werkstoffparameter.

## 1. Einführung

Entscheidend für die Verbesserung von Strukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) ist die Entwicklung neuer Materialien, Bauweisen und Fertigungstechnologien. Innerhalb des Förderprogramms „Neue Werkstoffe in Bayern“ wurden daher im Projekt „Mehrstufige Verfahren zur Herstellung von CFK-Integralstrukturen“ neue hybride Fertigungsverfahren untersucht. Die Entwicklung eines Fertigungsprozesses mit mehrstufiger Harzinfiltrationstechnik ermöglicht neue Ansätze für integrierte Bauweisen und kann zu einer erheblichen Kostenreduktion des Bauteils führen. Der mehrstufige Prozess sieht dabei eine Teilaushärtung der Trägerkomponente (z.B. Schalenelemente) und eine anschließende gemeinsame Aushärtung mit weiteren Komponenten (z.B. Versteifungselementen) vor. Zur Untersuchung geeigneter Zwischenstufen im Gesamtprozess wurden CFK-Platten mit steigenden Aushärtegraden der Epoxydharzmatrix untersucht. Mit zunehmendem Härtegrad (HG) weist die Epoxydharzmatrix eine sinkende chemische Reaktivität auf. Die mechanischen Eigenschaften der hier untersuchten Platten ändern sich in Abhängigkeit des Aushär-

tegrades grundlegend, so dass ein Kompromiss zwischen verbleibender chemischer Reaktivität und mechanischer Stabilität der Trägerkomponente gefunden werden muss. Um die Ursache der Veränderung in den mikromechanischen Schadensabläufen zu analysieren wurden die CFK-Platten in Vier-Punkt Biegung belastet und die entstehende Schallemission mittels Mustererkennungsverfahren untersucht.

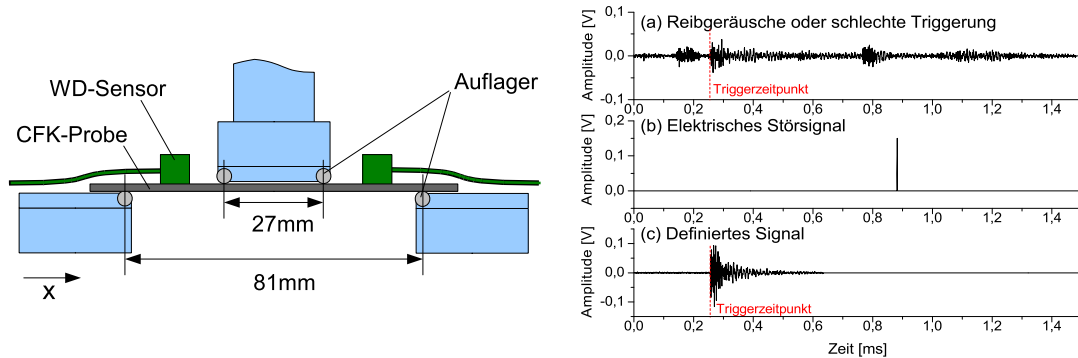
Zur Schadensanalyse von Faserverbundwerkstoffen mit Schallemission gibt es bereits zahlreiche Ansätze in der Literatur. Die meisten der bekannten Methoden lassen eine Unterscheidung zwischen Matrixrissen, Faserbrüchen und Mechanismen die vom Faser-Matrix Versagen abhängen (Faser-Matrix Ablösung oder Faserauszug), zu. Viele Ansätze verwenden hierzu feste Kriterien wie die Lage der Frequenzmaxima [3, 4, 5] oder die Gewichtung der Frequenzverteilung [1]. Eine unterschiedliche Frequenzzusammensetzung der Schallemission bei Faserbrüchen und Matrixrissen wird aufgrund verschiedener grundlegender Laborexperimente erwartet. Diese begründet sich vor Allem in den unterschiedlichen elastischen Eigenschaften von Faser und Matrix und dem zeitlichen Verlauf des „elementaren“ Schadensmechanismus [6]. Experimente an CFK-Strukturen mit variiertem Lagenaufbau zeigen ebenfalls eine deutliche Korrelation zwischen den auftretenden Frequenzzusammensetzungen und mikroskopisch beobachteten Schadensmechanismen [7]. Viele neuere Untersuchungen an Faserverbundwerkstoffen setzen auf eine Unterscheidung der Schadensmechanismen durch Mustererkennungsverfahren [7, 8]. Einer der Hauptgründe liegt in der Verwendung eines komplexeren Entscheidungskriteriums, dass eine bessere Unterscheidung verschiedener Signalklassen und damit assoziierter Schadensmechanismen erlaubt. Ein einziges festes Frequenzkriterium kann aufgrund der dispersiven Wellenausbreitung in Faserverbundwerkstoffen bereits nach kurzen Signallaufzeiten keine richtige Zuordnung mehr gewährleisten. Insbesondere die für Faserbrüche charakteristischen hohen Frequenzen werden in CFK-Platten sehr stark gedämpft. Zudem lässt sich bei Veränderung der fundamentalen Werkstoffparameter, wie beispielsweise Matrixhärtegrad oder Fasertyp, keine Unterscheidung von Schadensmechanismen anhand fester Frequenzkriterien vornehmen.

Grundlage für das hier angewendete Mustererkennungsverfahren bilden die Untersuchungen von Anasstassopoulos et. al. an faserverstärkten Kunststoffen [8]. Dabei wird nicht von einer festen Anzahl von Schadensmechanismen ausgegangen oder ein Klassifizierungsalgorithmus anhand von Testdaten trainiert. Stattdessen wird die Anzahl von Klassen gesucht, die bei den gewählten Wellenformparametern die größtmögliche Separation zueinander aufweist. Für die Berechnung der Separation werden Abstandskriterien nach der Definition von Davies und Bow verwendet [9, 10]. In der vorliegenden Untersuchung wird die Korrelation der gefundenen Klassen mit Schadensmechanismen anhand des Vergleichs der Lokalisierung der Schallquellen mit Mikroskopieergebnissen, sowie der Häufigkeit des Auftretens und der Frequenzzusammensetzung durchgeführt.

## **2. Messaufbau**

Es wurden vier CFK-Platten mit einem identischen, symmetrischen Lagenaufbau [0,(0;90),(0;90),(90;0),(90;0),0] mittels RTM6-Harzinfiltation in VAP®-Technik (Vacuum Assisted Process) hergestellt. Drei CFK-Platten wurden dabei einer verkürzten Temperaturbehandlung unterworfen, so dass der Härtegrad des Infiltrationsharzes von 100 % auf 60 %, 70 % und 80 % verringert wurde. Als Referenzprobe wurde zusätzlich eine CFK-Platte mit 100 % Härtegrad hergestellt. Die Evaluierung des eingestellten Härtegrades erfolgte im Anschluss durch vergleichende Messung an Begleitproben mit dynamischer Differenzkalorimetrie. Aus den  $2,3 \pm 0,1$  mm dicken Platten wurden je drei Streifen mit Abmessungen  $100 \pm 1$  mm  $\times$   $15,0 \pm 0,5$  mm (Länge  $\times$  Breite) zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften in Vier-Punkt Biegung entnommen. Der Messaufbau der Typ IV-

Proben in Vier-Punkt Biegung nach DIN-EN-ISO 14125 ist in Bild 1 gezeigt. Während der Messung wurden zwei WD-Sensoren (Physical Acoustics) auf den Proben angebracht und die entstandene Schallemission mit einem PCI-2 System (Physical Acoustics) mit 10 MS/s und 40 dB Vorverstärkung aufgezeichnet. Die Sensoren wurden mit einer mittelviskosen Baysilone-Paste (Bayer) angekoppelt und über zwei Klammern befestigt. Zur Filterung von Störgeräuschen wurde ein Bandpass von 20 kHz – 1 MHz verwendet.



**Bild 1.** Experimenteller Aufbau – Messung in Vier-Punkt Biegung nach DIN-EN-ISO 14125 (links) und typische aufgezeichnete Schallemissionssignale (rechts)

Zur Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit (ILS) wurden zusätzlich je drei Proben mit  $20,0 \pm 0,3$  mm Länge und  $10 \pm 0,1$  mm Breite aus den CFK-Platten entnommen und nach DIN-EN 2563 in Drei-Punkt Biegung gemessen. Zur begleitenden mikroskopischen Analyse wurde ein XL-30 (FEI) Rasterelektronenmikroskop verwendet.

### 3. Schallemissionsanalyse

#### 3.1 Datenvorverarbeitung

Entscheidend für eine gültige Klassifizierung von Schallemissionssignalen durch Mustererkennung sind eine hohe Güte der verwendeten Signale, sowie eine geeignete Auswahl von Wellenformparametern. Einige typische aufgezeichnete Signale einer Messung in Vier-Punkt Biegung sind hierzu in Bild 1 gezeigt. Vor der Anwendung von Mustererkennungs-algorithmen sollten typische Störsignale wie in Bild 1a gezeigt ausgeschlossen werden, da Wellenformparameter, die aus diesen Signalen extrahiert werden fehlerbehaftet sind. Beispielsweise wird der Energieinhalt des getriggerten Signals in Bild 1a durch zusätzlich aufgezeichnete Reflexionen oder überlagerte Signalanteile deutlich überschätzt. Beim Einsatz von Schwellwert basierenden Triggervorgängen ist die Aufzeichnung solcher Signale auch bei guter Parameterwahl kaum zu vermeiden, weshalb im Anschluss an die Messung entweder eine virtuelle Triggerung vorgenommen werden kann, oder diese Signale von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden müssen. Gleiches gilt für Signale von anderen Störquellen, wie beispielsweise Reibgeräusche oder die in Bild 1b abgebildeten elektrischen Störsignale, die in keinem Zusammenhang mit dem Schädigungsvorgang im Material stehen.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde zunächst die x-Koordinate der Signale lokalisiert. Die für die Lokalisierung verwendete Schallgeschwindigkeit der symmetrischen Plattenwellen wurde hierzu für jede Probe mit zwanzig Messungen der Signallaufzeit zwischen den beiden Sensoren und deren Abstand errechnet (s. Tabelle 1). Die Schallgeschwindigkeit wird dominiert durch die Orientierung der Fasern und die Dicke der Platte. Im Rahmen des Messfehlers (hier Standardabweichung) zeigt die Schallgeschwindigkeit keine Abhän-

gigkeit vom Härtegrad. Auffällig ist die Abweichung der Schallgeschwindigkeit bei einem Härtegrad von 60%, was auf eine starke Korrelation mit der Plattendicke hindeutet.

**Tabelle 1.** Verwendete Schallgeschwindigkeiten zur Lokalisierung

Probenplatte	Schallgeschwindigkeit	Plattendicke
Härtegrad 60%	4670 ± 50 m/s	2,2 ± 0,1 mm
Härtegrad 70%	4490 ± 80 m/s	2,4 ± 0,1 mm
Härtegrad 80%	4510 ± 90 m/s	2,4 ± 0,1 mm
Härtegrad 100%	4600 ± 20 m/s	2,3 ± 0,1 mm

Aus den lokalisierbaren Signalen wurden mit der Software Noesis manuell zwei Testdatensätze (verbleibende Störsignale und definierte Signale) zusammengestellt, die als Trainingsdaten für einen Klassifikationsalgorithmus basierend auf einem „backpropagating“ neuronalen Netzwerk [11] dienen. Dies ermöglicht eine automatisierte und gleichbleibende Identifikation und den Ausschluss von Störsignalen (etwa 2-4 % der Gesamtdaten). Die Güte der Klassifikation basiert auf der zuvor getroffenen manuellen Zuordnung.

### 3.2 Mustererkennungsverfahren

Die nach der Vorverarbeitung verbleibenden Signale wurden nun mittels Mustererkennung untersucht. Die Vorauswahl der Wellenformparameter orientiert sich dabei an den bisherigen Untersuchungen, die eine Diskriminierung anhand von Frequenzkriterien vornehmen [1, 3, 4, 5, 7]. Zusätzlich zu den von der Software Noesis [11] zur Verfügung gestellten Frequenzparametern wurde als weiteres Kriterium das „gewichtete Frequenzmaximum“ definiert und errechnet. Dieses und die weiteren zur Mustererkennung verwendeten Wellenformparameter sind in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2.** Wellenformparameter für Mustererkennungsverfahren

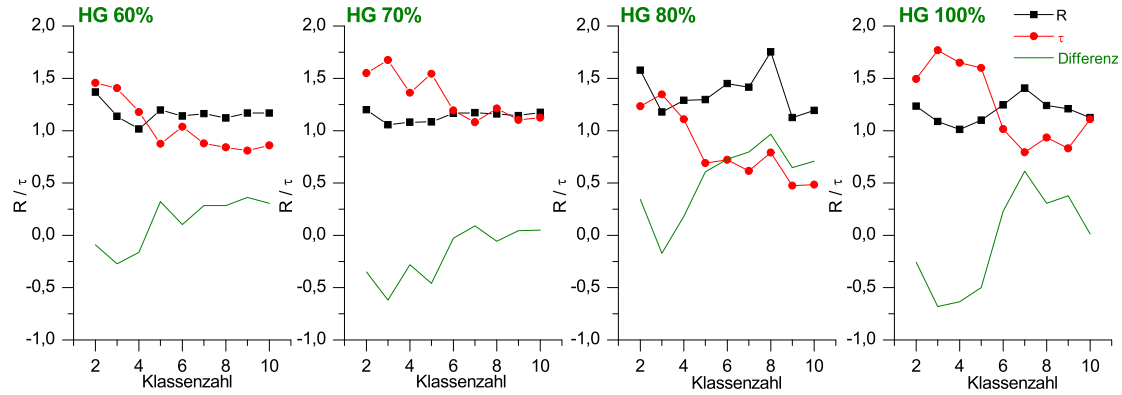
Wellenformparameter	Definition
Durchschnittliche Frequenz [Hz] (Average Frequency)	$\langle f \rangle = N/T$ mit $N$ : Anzahl der Schwellwertüberschreitungen und $T$ : Zeitdauer des Signals
Gewichtetes Frequenzmaximum [Hz] (Weighted Peak-Frequency)	$\langle f_{\max} \rangle = \sqrt{f_{\max} \cdot \int f \cdot \hat{U}(f) df / \int \hat{U}(f) df}$ mit $f_{\max}$ : Position des Frequenzmaximums und $\hat{U}(f)$ : Fouriertransformation des Signals $U(t)$
Frequenzanteile 1-3 [%] (Partial Power 1-3)	$\frac{\int_{f_1}^{f_2} \hat{U}^2(f) df}{\int_{0\text{kHz}}^{1200\text{kHz}} \hat{U}^2(f) df}$ Frequenzanteil 1: $f_1 = 0\text{kHz}$ ; $f_2 = 200\text{kHz}$ Frequenzanteil 2: $f_1 = 200\text{kHz}$ ; $f_2 = 350\text{kHz}$ Frequenzanteil 3: $f_1 = 350\text{kHz}$ ; $f_2 = 1200\text{kHz}$

Im Anschluss wurden die Wellenformparameter bezüglich ihrer Varianz normalisiert und eine Hauptachsentransformation durchgeführt [11]. Zur Bestimmung der größtmöglichen Separation der Klassen werden die Daten nun mit dem k-means Algorithmus klassifiziert und die nach Davies und Bouldin, bzw. Bow definierten Parameter  $R$  und  $\tau$  [9, 10] errechnet:

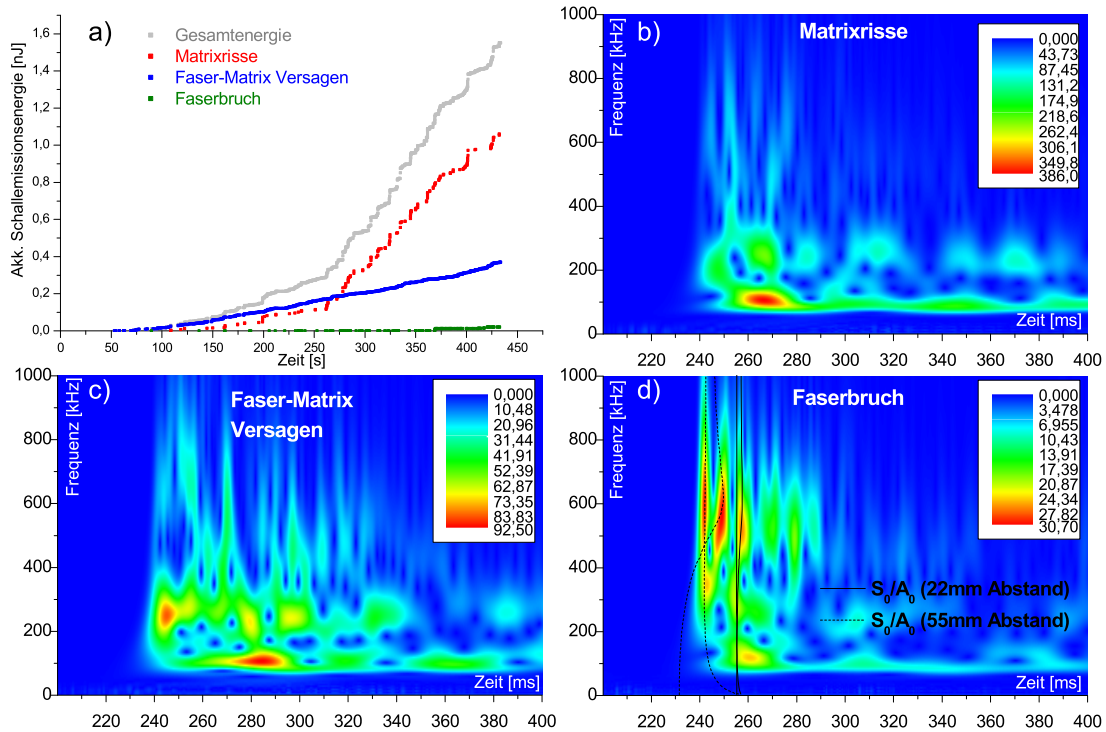
$$R_{ij} = \frac{D_i + D_j}{D_{ij}}; \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \frac{\min(D_{ij})}{\max(D_k)}; \quad (2)$$

Dabei werden mit  $D_i$  und  $D_j$  die mittleren Abstände aller Klassenelemente und mit  $D_{ij}$  der Abstand der Klassenmittelpunkte zueinander bezeichnet,  $\min(D_{ij})$  stellt den minimalen Abstand zweier Klassen und  $\max(D_k)$  den maximalen Abstand zweier Klassenelemente dar. Folglich unterscheiden sich die Klassen stärker voneinander, wenn niedrige Werte für  $R$  und hohe Werte für  $\tau$  erreicht werden. Die Klassenanzahl wird so gewählt, dass die Differenz ( $R - \tau$ ) minimal wird. Die Klassenanzahl dient als Indikator für die Anzahl der Schadensmechanismen, die mittels Schallemissionsanalyse unterscheidbar sind [8, 12]. In der vorliegenden Untersuchung wird bei allen Proben die beste Separation für drei Klassen gefunden, was beispielhaft an einer Probe je Härtegrad in Bild 2 dargestellt ist.



**Bild 2.** Untersuchung der Abhängigkeit der Parameter  $R$  und  $\tau$  von der Klassenanzahl



**Bild 3.** (a) Aufteilung der akkumulierten Schallemissionsenergie in Teilbeiträge von Matrixrisse, Faser-Matrix Versagen und Faserbrüchen einer Probe mit 70%-Härtegrad. (b-d) Die gemittelten Wavelet-Koeffizienten der einzelnen Schadensmechanismen errechnet mit AWARE++ [13] sowie überlagerte Dispersionskurven für  $S_0$ - und  $A_0$ -Moden im Abstand von 22 mm und 55 mm.

Bild 3a zeigt die akkumulierte Schallemissionsenergie über der Zeitdauer des Experiments und Teilbeiträge für die aus der Mustererkennung resultierenden drei unterschiedlichen



Klassen. Man erkennt deutlich, dass der steile Anstieg bei  $t \approx 260$  s in der Gesamtenergie-summe auf den Beitrag der Matrixrisse zurückzuführen ist. Im Unterschied hierzu ist der Anteil der Schallemissionssignale, deren Ursprung vom Faser-Matrix Versagen herrührt über die Zeitdauer der Belastung nahezu linear. Faserbrüche finden erst im späten Stadium der Vier-Punkt Biegung statt und lokalisieren in Übereinstimmung mit mikroskopischen Untersuchungen ausschließlich an den Positionen der oberen Auflager.

Bild 3b-d zeigen die zu jedem Schadensmechanismus zugehörigen gemittelten Wavelet-Koeffizienten. Diese beschreiben analog zu einem gemittelten Frequenzspektrum das charakteristische Frequenz-Zeit Verhalten der Wellenformen einer Klasse (Details zur Definition und Berechnung in [13]). In Bild 3d sind die fundamentalen symmetrischen ( $S_0$ ) und antisymmetrischen ( $A_0$ ) Plattenwellenmoden für die Abstände 22 mm und 55 mm zwischen Schallquelle und Sensor überlagert dargestellt. Diese beiden Abstände entsprechen den Positionen der oberen Auflager an denen der überwiegende Teil der Faserbrüche stattfindet. Die errechneten Dispersionskurven zeigen gute Übereinstimmung zu den gemittelten Wavelet-Koeffizienten, da die Laufzeiten der Einzelsignale zwischen Sensor und Schallquelle auf zwei enge Zeitbereiche beschränkt sind. Für eine kontinuierliche Verteilung der Laufzeiten (breite Verteilung der Lokalisierung) gehen die Dispersionskurven in den gemittelten Wavelet-Diagrammen zu kontinuierlichen Bändern über. Die charakteristische Frequenzverteilung für Faserbrüche (hohe Frequenzen) und Matrixrisse (tiefe Frequenzen) wird in diesen Diagrammen deutlich bestätigt und wurde für alle untersuchten Proben beobachtet. Die dritte durch Mustererkennung gefundene Klasse zeigt Anteile von hohen und tiefen Frequenzen und kann daher entsprechend den Überlegungen in [1, 3, 4, 5, 7] der Faser-Matrix-Wechselwirkung zugeordnet werden. Eine direkte Korrelation zwischen Schadensmechanismus und Intensität der angeregten  $A_0$ - bzw.  $S_0$ -Mode wurde von [2] vorgeschlagen. Diese kann im vorliegenden Fall aufgrund von Reflexionen, kontinuierlicher Laufzeitverteilungen und der ausgeprägten Eigencharakteristik des verwendeten Sensors im Rahmen dieser Untersuchung nicht zweifelsfrei geklärt werden.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Vergleich mit Bruchmechanik

Die Proben mit Härtegrad 80% und 100% zeigen bei Belastung in Vier-Punkt Biegung ein CFK-typisches Bruchverhalten mit starker Schädigung an den Position der oberen Auflager, während die Proben mit 60% und 70% ein deutlich ausgeprägtes Schubversagen entlang der mittleren Lagen aufweisen. Diese niedrige Scherfestigkeit wurde in den ILS-Versuchen bestätigt. Sie liegt bei den 70% und 80%-Proben deutlich höher. Auffällig ist zudem, dass bei einem Härtegrad von 80% die gemessenen mechanischen Eigenschaften einen maximalen Wert erreichen (s. Tabelle 3).

In Bild 4a ist die Häufigkeitsverteilung der identifizierten Schadensmechanismen und in Bild 4b die entsprechende Energieverteilung der Schallemissionssignale für alle Härtegrade gezeigt. Die beiden Diagramme zeigen, dass sich die 80%-Proben in der Häufigkeits-, bzw. Energieverteilung signifikant unterscheiden. In der Häufigkeitsverteilung zeigt sich bei 60% und 70%-Proben eine vergleichbar hohe Anzahl von Schadensereignissen mit Faser-Matrix Versagen, die mit zunehmendem Härtegrad sinkt und bei den 80% und 100%-Proben vergleichbar zu denen der Matrixrisse ist. Der relative Anteil der Faserbrüche ist nahezu unabhängig vom Härtegrad.

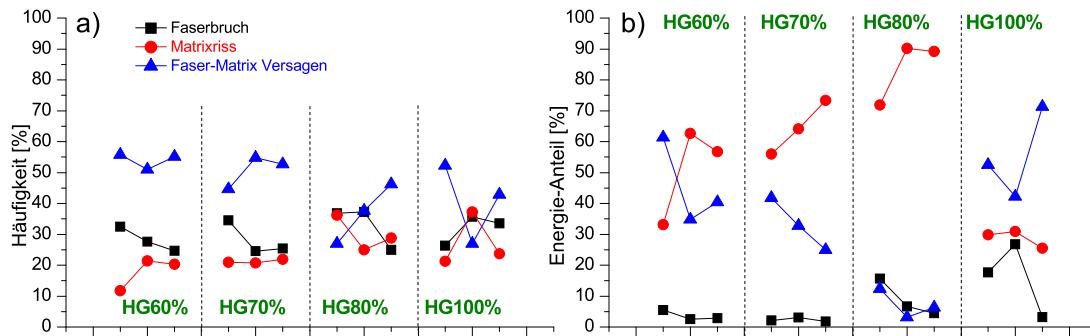


Bild 4. (a) Darstellung der Häufigkeitsverteilung und (b) Energieverteilung für jeden Härtegrad.

Im Gegensatz hierzu ist der relative Anteil der freigesetzten Energie der Faserbrüche bei den 60% und 70%-Proben etwa gleich und nimmt für die 80% und 100%-Proben deutlich zu. Die relativen Energieanteile des Faser-Matrix Versagens besitzen hingegen bei einem Härtegrad von 80% ein deutlich ausgeprägtes Minimum, die der Matrixrisse ein korrespondierendes Maximum. Bei den 100%-Proben kehrt sich die Gewichtung der beiden Energie-Anteile um. Die Korrelation der Schallemissionssignale mit den unterschiedlichen Schadensmechanismen lässt folgende Aussagen zu:

Der hohe Aktivitätsanteil (> 50%) von Faser-Matrix Versagen bei den 60% und 70%-Proben deutet auf ausgeprägtes interlaminares Versagen hin. Der abnehmende Energieanteil des Faser-Matrix Versagens mit zunehmendem HG (< 80%) deutet auf eine zunehmende interlaminare Scherfestigkeit hin. Dieser Trend kehrt sich bei der 100%-Probe um.

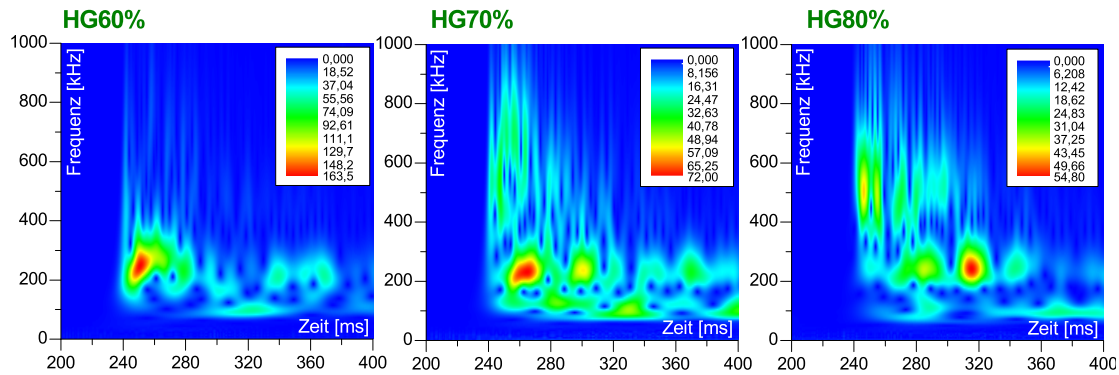
Untersuchungen mit Rasterelektronenmikroskopie bestätigen das aus den Schallemissionsmessungen abgeleitete Schadensbild. Bruchflächen von ILS-Proben mit HG 80% zeigen starke Schuppenbildung als Folge starker Faser-Matrix Anhaftung. Die Bruchfläche der HG 100%-Probe verläuft dagegen flächig an der Grenze zwischen Faserlagen und Matrix und deutet daher auf eine schwächere Anhaftung zwischen Fasern und Matrix hin. An Biegeproben mit HG 80% und 100% werden die aus den Schallemissionsmessungen abgeleitete Häufigkeitsverteilung von Faser-Matrix Versagen und Matrixrissen bestätigt. Die HG 60% und 70%-Proben weisen dagegen deutlich ausgeprägtes interlaminares Versagen durch Faser-Matrix Ablösung auf, was die gefundene Häufigkeitsverteilung in Bild 4a widerspiegelt. Die beobachtete Variation des Faser-Matrix Versagens mit dem Härtegrad könnte auf eine Abhängigkeit der Faser-Matrix Wechselwirkung vom Härtegrad hindeuten.

**Tabelle 3.** Bruchmechanische Kennwerte der teilausgehärteten Proben

Probenplatte	Biegespannung	E-Modul	Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit
Härtegrad 60%	361 ± 42 MPa	49,0 ± 1,5 GPa	16,8 ± 1,3 MPa
Härtegrad 70%	619 ± 46 MPa	48,0 ± 1,6 GPa	19,0 ± 1,3 MPa
Härtegrad 80%	734 ± 39 MPa	50,9 ± 2,0 GPa	41,5 ± 4,9 MPa
Härtegrad 100%	663 ± 25 MPa	42,8 ± 0,2 GPa	40,3 ± 3,2 MPa

#### 4.2 Frequenzzusammensetzung

Zum besseren Verständnis des Faser-Matrix-Versagens in Abhängigkeit des Härtegrades wurde die Frequenzzusammensetzung der entsprechenden Klassen von Schallemissionssignalen näher untersucht. Die gemittelten Wavelet-Koeffizienten dieser Klasse sind für drei Proben mit unterschiedlichem Härtegrad in Bild 5 gezeigt. Mit zunehmendem Härtegrad steigt das Verhältnis von höheren zu tieferen Frequenzanteilen deutlich an.



**Bild 5.** Vergleich der gemittelten Wavelet-Koeffizienten der Klasse für Faser-Matrix-Versagen in Abhängigkeit des Härtegrades.

Eine vergleichbare Frequenzverschiebung wurde in früheren Arbeiten bereits bei Messungen der kritischen Risszähigkeit und in Faserfragmentierungstests gefunden und mit zunehmender Faser-Matrix Ankopplung korreliert [2, 6]. Dies scheint auch im vorliegenden Fall naheliegend. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Frequenzverschiebung zusätzlich, oder allein vom zunehmenden Aushärtegrad der Matrix herrührt. Die mikroskopische Ursache der Frequenzverschiebung soll daher in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

## 5. Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass durch das vorgestellte Mustererkennungsverfahren eine Unterscheidung zwischen drei typischen Schadensmechanismen in Faserverbundwerkstoffen möglich ist, nämlich Schädigungen durch Matrixrisse, Faserbrüche und Faser-Matrix-Versagen. Die Verwendung des beschriebenen Mustererkennungsverfahrens stellt ein komplexes Entscheidungskriterium zur Trennung der einzelnen Mechanismen dar und kann auch bei Veränderung der fundamentalen Werkstoffeigenschaften eingesetzt werden. Dies ist mit einem festen Frequenzkriterium zur Unterscheidung nicht möglich. Die gefundenen Energieanteile der einzelnen Schadensmechanismen und die assoziierten bruchmechanischen Kennwerten erlauben eine konsistente Interpretation der auftretenden Schädigungen in Abhängigkeit vom Härtegrad.

Anhand der gemittelten Wavelet-Koeffizienten konnten die typischen Frequenzanteile für jeden Schadensmechanismus in Abhängigkeit des Aushärtegrades visualisiert werden. Diese stimmen gut mit den in der Literatur beschriebenen charakteristischen Frequenzverteilungen entsprechender Schädigungsmechanismen überein. Die mikroskopische Ursache der Frequenzverschiebung in Abhängigkeit des Härtegrades für Faser-Matrix Versagen soll in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

## 6. Danksagung

Wir danken dem Förderprogramm „Neue Werkstoffe in Bayern“ des Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie für die Finanzierung des Projekts „Mehrstufige Verfahren zur Herstellung von CFK-Integralstrukturen“.



## Referenzen

- [1] J. Bohse, J. Chen, A. Brunner, “*Acoustic Emission Analysis and Micro-Mechanical Interpretation of Mode I Fracture Toughness Tests On Composite Materials*”, Fracture of Polymers and Composites and Adhesives,ESIS publication 27, pp. 15–26 (2000).
- [2] M. A. Hamstad, A. O. Gallagher, J. Gary, “*A Wavelet Transform Applied To Acoustic Emission Signals: Part I: Source Identification*”, Journal of Acoustic Emission, Vol. 20, pp. 39-61 (2002).
- [3] P. deGroot, P. Wijnen, R. Janssen, “*Real-Time Frequency Determination Of Acoustic Emission For Different Fracture Mechanisms In Carbon/Epoxy Composites*”, Composites Science and Technology, Vol. 55, pp. 405–412 (1995).
- [4] Q. Q. Ni, E. Jinen, “*Fracture Behavior And Acoustic Emission In Bending Tests On Single-Fiber Composites*”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 56, pp. 779–796 (1997).
- [5] G. Qi, A. Barhorst, J. Hashemi, G. Kamala, “*Discrete Wavelet Decomposition Of Acoustic Emission Signals From Carbon-Fiber-Reinforced Composites*”, Composites Science and Technology, Vol. 57, pp. 89-403 (1997).
- [6] M. Giordano, L. Condelli, L. Nicolais, “*Acoustic Wave Propagation In A Viscoelastic Plate*”, Composites Science and Technology, Vol. 59, pp. 1735-1743 (1999).
- [7] S. Huguet, N. Godin, R. Gaertner, L. Salmon, D. Villard, “*Use Of Acoustic Emission To Identify Damage Modes In Glass Fibre Reinforced Polyester*”, Composites Science and Technology, Vol. 62, pp. 1433-1444 (2002)
- [8] A. A. Anastassopoulos, T. P. Philippidis, “*Clustering Methodology for the Evaluation of Acoustic Emission from Composites*”, Journal of Acoustic Emission, Vol. 13, pp. 11–21 (1995).
- [9] D. L. Davies, D. W. Bouldin, “*A cluster separation measure*”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 1, pp. 224-227 (1979).
- [10] S. Bow, “*Pattern recognition - Application to large data-set problems*”, 1rst ed., Marcel Dekker Inc., New York, (1984).
- [11] “*NOESIS Advanced Acoustic Emission Data Analysis and Pattern Recognition & Neural Networks Software for Acoustic Emission Applications*”, User’s Manual, Enviroacoustics S.E. (2006).
- [12] M. G. R. Sause, D. Schultheiß, S. Horn, „*Acoustic emission investigation of coating fracture and delamination in hybrid carbon fiber reinforced plastic structures*”, Journal of Acoustic Emission, Vol. 26, pp. 1-13 (2008)
- [13] M. G. R. Sause, “*AWARE++ Advanced Waveform Analysis Research Engine - Software manual Rev. 1*”, URL: <http://www.physik.uni-augsburg.de/exp2/downloads.de.html> (2009).